

УДК 533.9.004.14; 537.872.31

Л. В. СИМОНЧИК, М. С. УСАЧЁНОК

ОДНОМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПОЛОСОВАЯ СТРУКТУРА ИЗ ПЛАЗМЕННЫХ СТОЛБОВ

(Представлено членом-корреспондентом С. В. Гапоненко)

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск

Поступило 04.04.2014

Введение. В последние годы возрос интерес к созданию, исследованию и применению EBG (electromagnetic band gap) структур (или электромагнитных кристаллов) в элементах волноводной и антенной техники СВЧ (частотно избирательных поверхностей, фильтров, мультиплексоров, аттенуаторов, модуляторов, переключателей) [1–5]. EBG структуры являются аналогами фотонных кристаллов в оптическом диапазоне длин волн и, соответственно, характеризуются наличием полосового спектра пропускания [1; 6]. Большинство устройств в СВЧ области, основанных на эффекте EBG структуры, реализуются из металлических или диэлектрических элементов, имеют фиксированные параметры и не имеют возможности быстрого изменения конфигурации или подстройки. Это является проблемой для создания скоростных, сложных систем приема-передачи СВЧ излучения, управляемых с помощью компьютера. Газоразрядная плазма имеет большой потенциал для ее применения в EBG устройствах СВЧ в качестве управляющих элементов [7; 8]. Первые эксперименты по созданию двухмерной плазменной электромагнитной структуры на базе барьерного разряда были представлены в [9]. Полученное подавление сигнала СВЧ в полосе заграждения структуры составило 5 раз.

Для эффективного использования плазмы в EBG структурах необходимо, чтобы ее плазменная частота была во много раз больше частоты падающего излучения и частоты столкновений электронов с нейтральными частицами $\omega_{pe} \gg \omega \gg \nu$, или чтобы концентрация электронов в ней была значительно больше критической для падающего излучения СВЧ

$$n \gg n_c.$$

В качестве примера одномерной (1D) EBG структуры в нашей работе рассматривается полосно-пропускающий волноводный фильтр, который находит широкое распространение в технике СВЧ. В стандартном волноводе X -диапазона длин волн волноводный фильтр формируется путем размещения в сечении волновода металлических (или диэлектрических) стержней (резонансных окон), равномерно распределенных вдоль направления распространения волн. Стержни являются диафрагмами, образующими резонаторы в волноводе. Настройка и контроль характеристик СВЧ фильтров (коэффициента пропускания, поляризации и т. д.) осуществляется путем изменения электрической длины резонаторов за счет введения дополнительных неоднородностей в резонаторы (механический способ) [10] или за счет изменения электрических свойств диафрагм (электрический способ) [11]. Последний способ на данный момент наиболее перспективен. Примером фильтров с таким управлением является фильтр на основе монокристаллического железиттриевого граната, состоящий из трех-четырёх резонаторов и обеспечивающий высокую избирательность и ослабление – 70–80 дБ вне полосы пропускания. Однако рабочая мощность такого рода фильтров не превышает примерно 10 мВт и скорость переключения составляет порядка миллисекунд [11]. Электрическая перестройка также используется для создания быстродействующих модуляторов, переключателей и аттенуаторов, например, в диодных модуляторах СВЧ [12] время переключения составляет менее 10 нс, однако максимально допустимый уровень мощности не превышает 1 Вт.

Использование плазмы тлеющего разряда для управления характеристиками волноводного фильтра СВЧ кажется привлекательным, так как фильтры с плазменным управлением должны работать при больших мощностях падающего излучения СВЧ и иметь высокую скорость переключения, что демонстрируется в данной работе.

Расчет одномерной периодической структуры из плазменных столбов в волноводе. Трехмерная модель одномерной структуры из плазменных столбов в волноводной секции представлена на рис. 1, а. Для уменьшения вычислительного времени расчет выполнялся для половины модели. Предполагалось, что плазма является однородной во всех направлениях и частота столбонений отсутствует, а плазменные столбы имеют диаметр $d_1 = 3$ мм и заключены в стеклянные трубки внешним диаметром $d_2 = 4$ мм. Период расположения плазменных столбов был выбран равным $l = 38$ мм, что равно длине волны в волноводе Λ_0 (стандартное сечение волновода X диапазона частот – 23×10 мм²), которая определяется по формуле

$$\Lambda_0 = \lambda_0 (1 - (\lambda_0 / 2a)^2)^{-1/2},$$

где λ_0 – длина волны СВЧ излучения в вакууме; a – размер широкой стенки волновода ($a = 23$ мм). Такая длина резонаторов соответствует частоте 7,5 ГГц, а $\Lambda_0 / 2 = 19$ мм соответствует частоте 10,24 ГГц. Обе частоты попадают в рабочий диапазон частот 7–12 ГГц волновода 23×10 мм².

Для описания характеристик структуры в волноводе применялась матрица рассеяния (S -матрица), используемая в СВЧ технике для описания четырехполосников. Элементы S -матрицы определяются амплитудами падающих и отраженных волн на входах волноводной секции. Если (U_{in}) – амплитуда падающей волны и (U_{out}) – амплитуда отраженной волны, тогда по определению

$$(U_{out}) = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} (U_{in}),$$

где $s_{mn} = U_{outm} / U_{inn}$ – коэффициент пропускания волны из порта n в порт m при $m \neq n$ либо коэффициент отражения при $m = n$.

Расчет выполнялся в среде программы Ansoft HFSS [13]. При этом библиотека программы была дополнена описанием материала Plasma. Его электрические (действительная часть диэлектрической проницаемости и тангенс диэлектрических потерь) параметры задавались с помощью линейной аппроксимации на краях исследуемого частотного диапазона и вычислялись по формулам

$$\text{Re}(\epsilon) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{(\omega^2 + \nu^2)} \quad \text{и} \quad \text{tg}\delta = \frac{\text{Im}(\epsilon)}{\text{Re}(\epsilon)} = \frac{\omega_{pe}^2 \nu}{\omega(\omega^2 + \nu^2 - \omega_{pe}^2)}.$$

Магнитная проницаемость и тангенс магнитных потерь принимались постоянными и равными единице и нулю, соответственно, во всем частотном диапазоне.

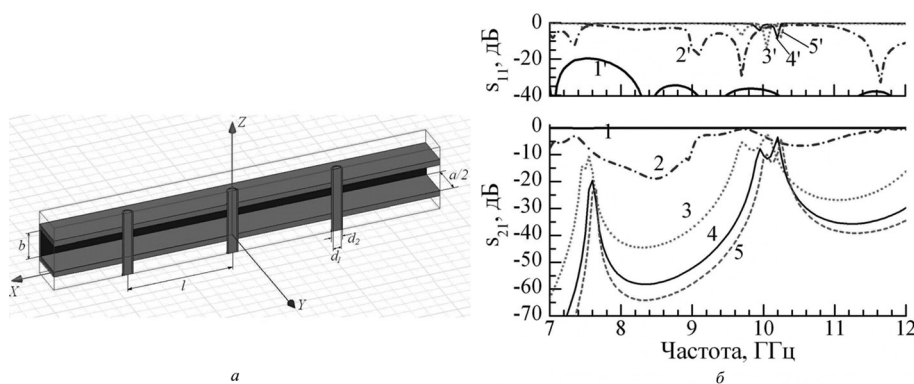


Рис. 1. а – Трехмерная графическая модель 1D EBG структуры в волноводе; б – частотные зависимости коэффициентов s_{11} и s_{21} данной структуры, рассчитанные при концентрации электронов: 1 – 10^{12} см⁻³; 2 – 10^{13} см⁻³; 3 – 10^{14} см⁻³; 4 – 10^{15} см⁻³; 5 – медные стержни

Результаты расчетов коэффициентов s_{11} (отражение) и s_{21} (пропускание) 1D EBG структуры при различных значениях концентрации (от 10^{12} до 10^{15} см $^{-3}$) электронов в плазменных столбах и отсутствии столкновений электронов с нейтральными частицами ($\nu = 0$) представлены на рис. 1, б. При минимальной концентрации, использованной в расчете (10^{12} см $^{-3}$), полосовой спектр пропускания не образуется и СВЧ волна проходит через структуру. При значениях концентрации электронов в столбах (около 10^{13} см $^{-3}$), превышающих критическую (около 10^{12} см $^{-3}$) для частоты распространяющейся волны (10 ГГц), в спектре пропускания начинают появляться полосы заграждения и пропускания. Однако их контрастность малая. Четко различимые полосы пропускания наблюдаются в спектре пропускания при концентрациях электронов, в плазменных столбах более 10^{14} см $^{-3}$. При этом, с увеличением концентрации электронов, обе полосы смещаются в высокочастотную область (низкочастотная – с 7 до 7,5 ГГц и высокочастотная – с 9 до 10,2 ГГц), сужаются и их уровни пропускания уменьшаются до -20 дБ и -5 дБ (у низкочастотной и высокочастотной полос соответственно).

Если исходить из модели, заложенной в расчет, то смещение полос спектра пропускания не должно было наблюдаться, так как спектр пропускания определяется длиной резонаторов, которая не менялась в расчете при различных концентрациях плазмы. По-видимому, наблюдаемое смещение полос пропускания связано с глубиной проникновения СВЧ волны в плазму. Эта глубина характеризуется толщиной скин-слоя δ , которая рассчитывается по формуле [10]

$$\delta = \frac{1}{\alpha},$$

где α – мнимая часть волнового числа СВЧ волны

$$\alpha^2 = \frac{1}{2} \frac{\omega^2}{c^2} \left\{ \left[\left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 + \frac{\nu^2}{\omega^2} \left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \nu^2} \right)^2 \right]^{1/2} - \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \nu^2} \right) \right\}.$$

Расчет показывает, что при увеличении концентрации электронов от $n_e = 10^{13}$ см $^{-3}$ до $n_e = 10^{15}$ см $^{-3}$ величина скин-слоя уменьшается от 1,8 до 0,2 мм соответственно, что приводит к увеличению эффективного диаметра плазменных столбов и, соответственно, уменьшению длин резонаторов и смещению полос пропускания в сторону больших частот.

Положим величину концентрации электронов в плазменных столбах фиксированной и равной 10^{14} см $^{-3}$. Будем изменять диаметры плазменных столбов от 1 до 6 мм. Соответствующие спектры пропускания представлены на рис. 2, а. Видно, что увеличение диаметров приводит к сужению полос пропускания и увеличению контрастности спектров. Однако при диаметрах равных 5 мм и более пропускание в полосах пропускания начинает заметно уменьшаться и сами полосы искажаются.

Рассмотрим влияние частоты столкновений электронов с нейтральными частицами ν , которая определяет уровень поглощения электромагнитной энергии, на спектр пропускания 1D EBG структуры. Значения S -коэффициентов 1D плазменной EBG структуры при различных значениях

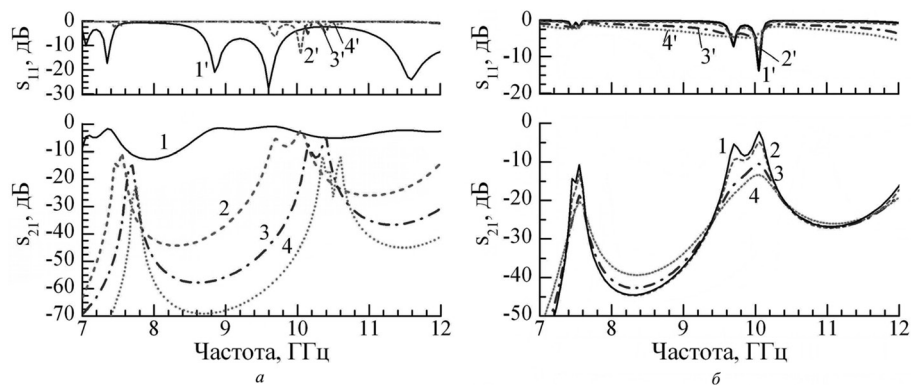


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициентов s_{11} и s_{21} структуры из трех плазменных столбов с $n_e = 10^{14}$ см $^{-3}$: а – при различных значениях диаметров столбов: 1 – 1 мм, 2 – 3 мм, 3 – 5 мм, 4 – 6 мм; б – при различных значениях частоты столкновений: 1 – $\nu = 0$ с $^{-1}$; 2 – $\nu = 10^{10}$ с $^{-1}$; 3 – $\nu = 5 \cdot 10^{10}$ с $^{-1}$; 4 – $\nu = 10^{11}$ с $^{-1}$

ях ν показаны на рис. 2, б. Значение концентрации электронов принималось равным 10^{14} см $^{-3}$. Можно видеть, что при увеличении частоты столкновений происходит уменьшение контрастности спектра пропускания и уменьшение уровня пропускания в полосах пропускания. Первое, по-видимому, связано с увеличением толщины скин-слоя и, соответственно, с уменьшением размеров отражающей части плазмы. Толщина скин-слоя при изменении частоты столкновений от 10^{10} до 10^{11} с $^{-1}$ меняется от 0,53 до 0,85 мм для частоты 9,5 ГГц. Второе связано с поглощением мощности СВЧ волны плазмой, что подтверждается уменьшением отражения s_{11} (рис. 2, б)

Эксперимент. Плазменная одномерная электромагнитная полосовая структура образована в волноводе сечением 23×10 мм 2 и длиной 20 см тремя положительными столбами тлеющего разряда в лампах ГШ-5 (ГШ-6 или ГШ-2), помещенных перпендикулярно широким стенкам волновода в отверстия, расположенные с периодом $l = 38$ мм (рис. 3, а). Лампа ГШ-5 – газоразрядная лампа, наполненная неоном при давлении 70 Торр. Ее внутренний диаметр составляет 3 мм, внешний – 4 мм, длина – 20 см. Постоянное напряжение на электродах лампы при рабочем токе 70 мА составляет 200 В. В соответствии с оценками, выполненными по приведенной напряженности электрического поля в лампах, концентрация электронов в плазме ламп ГШ-5 составляет $0,7 \cdot 10^{13}$ – $3,5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ при разрядном токе в диапазоне 30–120 мА, что превышает критическую концентрацию для падающего излучения с частотой 7–12 ГГц более чем на порядок величины.

Для установления влияния диаметра плазменного столба на вид спектра пропускания были использованы лампы ГШ, имеющие различные внутренние диаметры: ГШ-6 – 1,5 мм, ГШ-5 – 3 мм и ГШ-2 – 6 мм. Отношение диаметра плазменного столба к периоду их расположения в волноводе составляет 0,026, 0,04 и 0,08 соответственно. Спектр пропускания волноводной секции с лампами ГШ-6 при разрядном токе в них 25 мА, что соответствует плотности тока около 1,4 А/см 2 , представлен на рис. 3, б (кружки). Видно, что практически полное пропускание имеет место во всем диапазоне частот. Незначительное (до –4 дБ) уменьшение СВЧ мощности происходит, по-видимому, из-за ее поглощения плазмой. Экспериментальные спектры пропускания для случая структур, сформированных только из трех ламп ГШ-5 при токе 100 мА или только из ламп ГШ-2 при токе 400 мА, представлены на рис. 3, б (квадраты и треугольники соответственно). Заметим, что плотность тока в этих лампах также составляет около 1,4 А/см 2 . Можно ожидать, что концентрации электронов в лампах разного типа при одинаковой плотности тока будут близкими по величине. Оценки по измеренным значениям приведенного электрического поля в положительных столбах ламп ($E/N \sim 0,6$ – $0,15$ В/см) с использованием программы BOLSIG+ [14] дают величину концентрации электронов около $2,8 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. Расчетные спектры пропускания (сплошные кривые на рис. 3, б) волноводной секции получены для соответствующих геометрий при частоте столкновений электронов с нейтральными частицами, равной $2,8 \cdot 10^{10}$ с $^{-1}$, и концентрации электронов в плазменных столбах $1 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. Как видно, экспериментальные и расчетные спектры находятся в хорошем соответствии. Хотя следует заметить, что значение концентрации электронов, использованное в расчетах, примерно в 3 раза ниже, чем полученное из оценок по приведенной напряженности поля. Но это различие небольшое, так как в расчетах не учитывалось влияние скин-слоя и радиальная неоднородность столба плазмы (особенно при большом диаметре). Видно, что увеличение диаметра плазменных столбов позволяет увеличить контрастность спек-

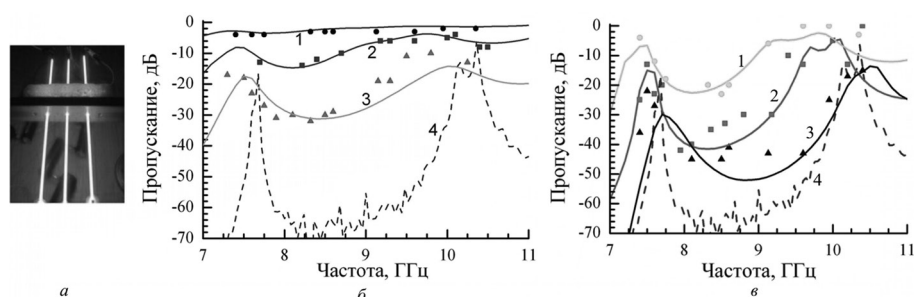


Рис. 3. а – Фотография 1D EBG структуры из ламп ГШ-5, расположенных с периодом 38 мм; б – спектры пропускания волноводной секции при питании ламп ГШ от источника постоянного напряжения и в – от источника импульсного напряжения. Точки – эксперимент, кривые – расчет; 1, 2, 3 – волновод с лампами ГШ-6, ГШ-5 и ГШ-2 соответственно; 4 – волновод с металлическими стержнями

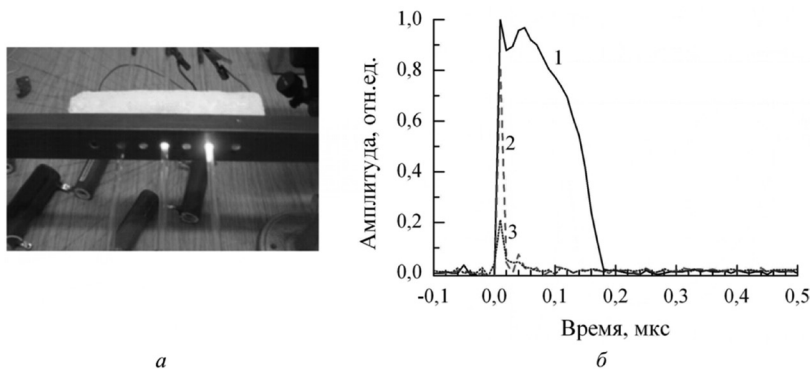


Рис. 4. *а* – Фотография ламп ГШ-5 с СВЧ разрядами в них; *б* – осциллограммы падающего (1) и прошедших мощных импульсов СВЧ: 2 – при СВЧ разрядах в лампах, 3 – при постоянном токе в лампах 200 мА

тра пропускания структуры незначительно, но при этом уровень пропускания в полосах пропускания изменяется от 0 до -15 дБ и -20 дБ для высокочастотной и низкочастотной полос соответственно. Такое значительное уменьшение уровня пропускания в полосе пропускания, по-видимому, связано с увеличением объема, в котором происходит поглощение СВЧ волны.

С целью увеличения контрастности спектров пропускания плазменных структур был использован импульсный режим питания ламп, позволяющий получить разрядный ток в лампах до 3 А при импульсе напряжения 2 кВ длительностью ~ 2 мкс. С помощью СВЧ диода регистрировались зависимости амплитуд проходящих сигналов на различных частотах от времени, которые показали, что полосовой спектр пропускания может существовать в течение 30–40 мкс. Это время определяется временем распада плазмы, которая образовалась в токовой фазе разряда. Использование импульсного режима питания ламп позволило значительно увеличить контрастность спектров пропускания 1D EBG структур сформированных из ламп ГШ. Так, разница между уровнем пропускания сигнала СВЧ в полосе пропускания и уровнем вне полос пропускания для структуры из ламп ГШ-6 составила 20 дБ, для структуры из ГШ-5 – 30 дБ, для структуры из ГШ-2 – более 30 дБ (рис. 3, в). Следует отметить значительное уменьшение проходящего сигнала СВЧ в высокочастотной полосе пропускания (до -17 дБ) для структуры из ламп ГШ-2. Спектры пропускания для 1D EBG структуры из плазменных столбов, рассчитанные при частоте столкновений $2,8 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ и концентрации электронов $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, представлены на рис 3, в сплошными кривыми.

Одномерная плазменная EBG структура из ламп ГШ может быть применена для управления параметрами импульса СВЧ, например, для ослабления или изменения длительности импульса. При этом частота импульса СВЧ должна попадать в область запрещенной зоны плазменной EBG структуры. Рассмотрены два случая. Первый – мощность падающего излучения СВЧ настолько велика, что ее достаточно для осуществления СВЧ пробоя в лампах и структура формируется под действием этого излучения. И второй – мощности проходящего излучения недостаточно для СВЧ пробоя и существенного изменения плотности плазмы в уже существующих разрядах.

В первом случае в эксперименте использовался импульсный генератор СВЧ, который излучает импульсы СВЧ на частоте 9,15 ГГц мощностью около 50 кВт, длительностью 150 нс и с частотой повторения 2 кГц. При таких условиях в лампах, в которых предварительно разряд не создавался, возникают СВЧ разряды различной интенсивности по мере удаления от источника (рис. 4, а). На опыте было получено сокращение длительности СВЧ импульса от 150 нс (рис. 4, б, кривая 1) до 20 нс (кривая 2). Если же в лампах до прохождения импульса СВЧ горели разряды (лампы ГШ-5, разрядный ток 200 мА), то длительность импульса также сокращается, но амплитуда уменьшается в несколько раз (рис. 4, б, кривая 3). Уменьшение амплитуды проходящей части импульса СВЧ в этом случае объясняется существованием слабой EBG структуры уже при постоянном токе ламп.

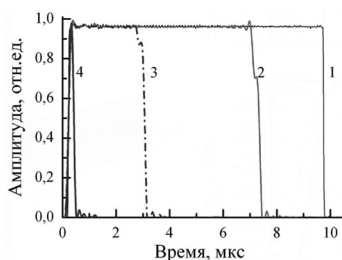


Рис. 5. Осциллограммы прошедших импульсов СВЧ при различных временах задержки: 1 – падающий импульс; 2 – 7 мкс; 3 – 3 мкс; 4 – 50 нс

Во втором случае использовался СВЧ генератор мощностью 5 мВт, что недостаточно для СВЧ пробоя газа в лампах. Поджиг плазменных столбов осуществляется от внешнего импульсного источника напряжения, параметры которого приведены выше. Варьировалось время задержки подачи импульсного напряжения на лампы относительно фронта падающего СВЧ импульса. Это время будет определять длительность СВЧ сигнала, прошедшего через волноводную секцию. На рис. 5 представлены огибающие прошедшего импульса СВЧ на частоте 8,5 ГГц при временах задержки 7 мкс (кривая 2), 3 мкс (3) и 50 нс (4). Длительность падающего импульса при этом составляет 10 мкс (кривая 1).

Заключение. Созданы одномерные электромагнитные полосовые структуры из плазменных неоднородностей в волноводе 3-сантиметрового диапазона длин волн. В результате проведенного численного моделирования спектров их пропускания определены оптимальные диапазоны электронной концентрации 10^{14} – 10^{15} см⁻³, частоты столкновений ($<10^{11}$ с⁻¹), диаметров плазменных столбов (3–4 мм) и их число 3, при которых уменьшение пропускания в полосах пропускания не превышает 5 дБ, а подавление вне полос пропускания более 40 дБ. Одномерная плазменная электромагнитная полосовая структура в волноводе 3-сантиметрового диапазона длин волн протестирована при большой мощности СВЧ излучения (около 50 кВт) и показано, что время переключения пропускания составляет 10–20 нс. При этом при падающей мощности, превышающей необходимую для СВЧ пробоя в лампах, в них зажигаются СВЧ разряды, формирующие ЕВГ структуру, и длительность проходящего импульса СВЧ сокращается с 150 нс до десятков наносекунд. Если же мощности падающего СВЧ излучения недостаточно для пробоя в лампах, то, варьируя задержку между передним фронтом импульса СВЧ и импульсом поджига ламп, можно управлять длительностью проходящего СВЧ импульса. В СВЧ технике плазменные электромагнитные полосовые структуры могут быть использованы в качестве фильтров, ключей, модуляторов и др., и могут найти применение в радиолокации и системах защиты от электромагнитного воздействия.

Литература

1. Банков С. Е. Электромагнитные кристаллы. М., 2010.
2. Moghadasi S. M., Attari A. R., Mirsalehi M. M. // Progress In Electromagnetics Research. 2008. Vol. 83. P. 323–333.
3. Xu H.-J., Zhang Y.-H., Fan Y. // Progress In Electromagnetics Research. 2007. Vol. 73. P. 239–247.
4. Schurig D. et al. // Science. 2006. Vol. 314, N 5801. P. 977–980.
5. Chen H. et al. // Physics Review B. 2007. Vol. 76, N 24. P. 201104-1–201104-4.
6. Гапоненко С. В. Оптические аналоги квантовых явлений. Минск, 2009.
7. Lo J., Sokoloff J., Callegari T., Boeuf J. P. // Appl. Phys. Lett. 2010. Vol. 96, N 25. P. 251501-1–251501-3.
8. Safronau Ya. A., Simonchik L. V. // IEEE Trans. Plasma Phys. 2011. Vol. 39, N 11. P. 2098–2099.
9. Sakai O., Tachibana K. // Plasma Sources Sci. Techn. 2012. Vol. 21, N 1. P. 013001.
10. Andreev D. P., Gak I. I., Tsymler I. I. Mechanically tunable microwave devices and separation filters. Moscow, 1973. – 232 p.
11. Belov L. // Electronics, Science, Technology, Buisness. 2004. N 5. P. 62–67.
12. ОАО «ФНПЦ «НИИПИ «Кварц» имени А. П. Горшкова» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kvarz.com/general/modul.html>.
13. Ansoft HFSS [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/High-Performance+Electronic+Design/ANSYS+HFSS>.
14. BOLSIG+ 2005, CPAT [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.laplace.univ-tlse.fr/Download/?lang=fr>.

L. V. SIMONCHIK, M. S. USACHONAK

m.usachonak@dragon.bas-net.by

ONE-DIMENSIONAL ELECTROMAGNETIC BAND GAP STRUCTURE FORMED BY PLASMA COLUMNS

Summary

The results of simulation and experimental study of the one-dimensional electromagnetic band gap structure formed solely by plasma columns in the waveguide of X frequency band (3 cm wavelength range) are presented. The simulations show that the plasma structure is formed at a value of the electron density more than 10^{14} cm⁻³ and of the plasma column diameter of 3–4 mm. Computations are in good agreement with experimental data. The possibility of variation of the microwave pulse duration from 10 microseconds to tens of nanoseconds is demonstrated. The plasma electromagnetic band gap structure was tested at high microwave power (~50 kW).